

鉛フリーはんだ材の粘塑性構成モデルと 電子実装基板熱変形解析に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、鉛を含むはんだ材を用いた電子製品の投棄による環境破壊が危惧されている。すなわち、酸性雨などにより投棄された電子製品から鉛イオンが溶出し、土壤汚染や地下水汚染の問題が深刻化してきている。このため、鉛を含まない、いわゆる、鉛フリーはんだ材の開発が盛んに行われている。鉛フリーはんだ材は鉛はんだ材とは異なる力学特性を有しており、鉛フリーはんだ材の力学特性の解明が急務となっている。

一方、電子デバイスにおける高密度実装のための技術として、Ball Grid Array (BGA) と呼ばれる微細はんだ接続が広く行われている。BGA 接続を用いた高密度実装基板は、はんだ材を基板にシルクスクリーンの要領で印刷してその上に IC パッケージを載せ、それを高温の炉の中に入れてはんだ材を溶かし、接合するリフロープロセスにより製作される。リフロープロセスでの冷却時に IC チップと基板の線膨張係数の差により IC チップと基板に反りを生じ、このことが機器の信頼性に重大な影響を与える。また、機器の ON, OFF の繰返しにより、稼動時の発熱に起因する熱変形が基板に繰返し作用し、はんだ接続部分は低サイクル疲労によって破壊に至る。

従来の鉛はんだ材では、リフロープロセスや使用時に発生する熱によって変形が発生しても、鉛はんだ材特有の大きな粘塑性変形により、IC チップと基板の反りが緩和される。ところが、鉛フリーはんだ材を用いた場合には、鉛はんだ材との粘塑性変形特性が異なるため、鉛はんだ材を用いた場合と同等な反りの緩和を期待することはできない。このことから、本研究では、鉛はんだ材と異なる力学特性を有する鉛フリーはんだ材の粘塑性変形特性を実験的に明らかにすると共に、その力学特性が精度良く記述可能な粘塑性構成モデルについて検討する。さらに、企業で広く構造解析に用いている汎用有限要素法解析ソフトへ構成モデルを組み込み、粘塑性構成モデルを用いた電子実装基板の熱変形解析を行い、リフロー時や使用時に生じる鉛はんだ材と鉛フリーはんだ材の熱変形特性の違いについて検討する。

本論文は 6 章により構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、および目的について述べている。

第 2 章では、はんだ材の基本的な力学特性を得るために Sn-3Ag-0.5Cu 材と Sn-37Pb 材

を用いた実験を行う。実験としては、3種類のひずみ速度による純粋引張り試験、3種類のひずみ速度および2種類のひずみ振幅による一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷試験、3種類の保持応力によるクリープ試験、10000秒間の応力緩和試験をそれぞれ313K、353K、393Kの3種類の雰囲気温度で行う。以上の実験の結果から鉛はんだ材と鉛フリーはんだ材の基本的力学特性の違い、特に粘塑性変形特性の違いについて検討する。

第3章では、第2章の実験により得られた基本的力学特性を正確に記述するための非弾性構成モデルに関する検討を行う。BGA接続に使用されるはんだ材は、繰返し非弾性変形による低サイクル疲労によって破壊する。よって、この非弾性変形挙動を正確に記述できる構成モデルが必要である。また、はんだ材の非弾性変形は塑性変形とクリープなどの粘塑性変形により構成されている。粘塑性変形を含む非弾性変形を記述するための構成モデルには、塑性変形と粘塑性変形を分離した構成モデルと、両者を分離せずまとめた、いわゆる統一型粘塑性構成モデルがある。分離型の構成モデルでは、塑性変形部分と粘塑性変形部分の材料定数をそれぞれ定めるために、実験から得られるひずみを塑性成分と粘塑性成分に分ける必要があり、その取扱が煩雑になる。このため、本研究では材料定数の数が少なく比較的容易に材料定数の同定が可能なEstrinの統一型粘塑性構成モデルを用いて、はんだ材の基本的力学特性の記述を試みる。

第4章では、Sn-3Ag-0.5Cu材とSn-37Pb材を用いて、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷による疲労実験を313K、353K、393Kの3種類の雰囲気温度で行い、疲労寿命評価法の検討を行う。疲労寿命評価のためには、疲労寿命の定義と疲労寿命と関連付ける指標の定義が重要となる。本研究では、(社)日本材料学会「はんだの低サイクル疲労試験法標準」で推奨されている疲労寿命の定義を用いる。また、疲労寿命と関連付ける指標として、Manson-Coffin則で用いられる非弾性ひずみ振幅と、安定時のヒステリシスループの面積で表される単位体積あたりの粘塑性ひずみ仕事である非弾性ひずみエネルギー密度を用いる。これらにより導出した疲労寿命評価法に、第3章の統一型粘塑性構成モデルによりシミュレーションした応力-ひずみ関係から算出する、非弾性ひずみ振幅および非弾性ひずみエネルギー密度を適用して、Sn-3Ag-0.5Cu材とSn-37Pb材の疲労寿命予測を試みる。

第5章では、実際の電子実装基板のリフロープロセスおよび使用時における熱変形解析を行う。このためにまず、第3章の統一型粘塑性構成モデルを、汎用有限要素法解析ソフトMSC.Marc2001にユーザー・サブルーチンを用いて組み込む。そして、BGAを用いた実際の電子実装基板3次元有限要素モデルを作成する。電子実装基板の変形量は、BGA接続部の接点数に依存すると考えられることから、接点数を変えた4種類の有限要素モデルを作成する。その後、リフローの冷却プロセス中に生じる基板のたわみ解析を鉛および鉛フリーはんだ材についてそれぞれ行い、リフローによりBGA接続部に生じるひずみ、応力および電子実装基板の反り量の違いについて検討する。特に、反り量に影響を与えるひずみと応力の回復量の違いを検討し、粘塑性変形が反り量に与える影響について明確にする。さらに、使用時の熱サイクルを模擬した解析によりリフロープロセス時に発生する電子実装基板の反りが実機使用時に与える影響についての検討も行う。

第6章は、本論文の総括であり、本研究で得られた結論をまとめて示している。

学位論文審査の要旨

主 査 助 授 佐々木 克 彦
副 査 教 授 野 口 徹
副 査 教 授 但 野 茂

学 位 論 文 題 名

鉛フリーはんだ材の粘塑性構成モデルと 電子実装基板熱変形解析に関する研究

近年、鉛を含むはんだ材を用いた電子製品の投棄による環境破壊が危惧されている。このため、鉛を含まない、いわゆる、鉛フリーはんだ材の開発が盛んに行われている。鉛フリーはんだ材は鉛はんだ材とは異なる力学特性を有しており、鉛フリーはんだ材の力学特性の解明が急務となっている。一方、Ball Grid Array (BGA) と呼ばれる微細はんだにより製作される電子実装基板は、その製作において電子部品と基板をはんだにより接着するリフロープロセスや、使用時の温度変化により熱変形を生じる。新たな鉛フリーはんだ材の開発のためには、鉛フリーはんだの変形特性を精度の良く記述できる粘塑性構成モデルによる電子実装基板の熱変形解析手法の確立が必要である。

本研究は、鉛フリーはんだ材の粘塑性変形特性を精度良く記述可能な粘塑性構成モデルの検討を行うとともに、電子実装関連企業で広く用いられている汎用有限要素法解析ソフトへ粘塑性構成モデルを組み込み、高精度の電子実装基板の熱変形解析手法を確立し、リフロー時や使用時に生じる鉛はんだ材と鉛フリーはんだ材の熱変形特性の違いについて明確にすることを目的としている。

まず、はんだ材の基本的な力学特性を得るために、代表的な鉛フリーはんだ Sn-3Ag-0.5Cu 材と鉛はんだ Sn-37Pb 材を用いて、異なるひずみ速度による純粋引張り試験、異なるひずみ速度、および、ひずみ振幅での一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷試験、異なる保持応力によるクリープ試験と応力緩和試験を、それぞれ雰囲気温度を変えて行った。これにより、鉛フリーはんだ材は鉛はんだ材に比べて、ひずみ速度依存性、クリープ変形、応力緩和などの粘塑性変形が生じにくいことを明らかにした。

ついで、実験により得られた鉛フリーはんだの基本的力学特性を正確に記述するための非弾性構成モデルに関する検討を行った。材料定数の数が少なく比較的容易に材料定数の同定が可能な Estrin の統一型粘塑性構成モデルを用いて、はんだ材の基本的力学特性の記述を行った。Estrin の粘塑性構成モデルの材料定数を的確に定めれば、鉛フリーはんだと鉛はんだ双方の粘塑性変形特性を的確にシミュレーション可能であることを

示した。

また、統一型粘塑性構成モデルのアプリケーションの一つとして、疲労寿命予測を行った。このために、鉛フリーはんだ Sn-3Ag-0.5Cu 材と鉛はんだ Sn-37Pb 材を用いた一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷による疲労実験を 3 種類の雰囲気温度で行った。疲労寿命評価には、疲労寿命と関連付ける指標として、Manson-Coffin 則で用いられる非弾性ひずみ振幅と、安定時のヒステリシスループの面積で表される非弾性ひずみエネルギー密度を用いた。構築した疲労寿命評価法に、統一型粘塑性構成モデルによりシミュレーションし算出した、非弾性ひずみ振幅および非弾性ひずみエネルギー密度を適用して、Sn-3Ag-0.5Cu 材と Sn-37Pb 材の疲労寿命予測を行い、統一型粘塑性構成モデルにより疲労寿命を的確に予測できることを示した。

さらに、統一型粘塑性構成モデルにより、実際の電子実装基板のリフロープロセスおよび使用時における熱変形解析を行い、鉛フリーはんだと鉛はんだを用いた電子実装基板の熱変形特性の違いを明確にした。このためにまず、電子機器メーカーで多く用いられている汎用有限要素法解析ソフト MSC.Marc2001 にユーザー・サブルーチンを用いて統一型粘塑性構成モデルを組み込み、リフローの冷却プロセス中に生じる基板の反り解析を鉛および鉛フリーはんだ材についてそれぞれ行った。そして、リフローにより BGA 接続部に生じるひずみ、応力および電子実装基板の反り量の違いについて検討し、鉛フリーはんだを用いた電子実装基板の反り量は、従来の鉛はんだを用いた電子実装基板に比べ大きいことを明らかにした。さらに、使用時の熱サイクルを模擬した解析によりリフロープロセス時に発生する電子実装基板の反りが実機使用時に与える影響についての検討を行い、リフロープロセスで生じた基板の初期反りは、使用時の熱サイクルによる基板の反り量には影響を与えないことを明らかにした。

これを要するに、著者は、電子実装基板の鉛フリー化の要である鉛フリーはんだの粘塑性変形特性を詳細に明らかにし、これを統一型粘塑性構成モデルで記述するとともに、統一型粘塑性構成モデルを組み込んだ汎用有限要素法解析ソフトによる熱変形解析を可能にし、鉛フリー化電子実装基板の熱変形特性を明確にしておき、鉛フリー電子実装基板技術の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。